专刊：科技支撑“双碳”目标实现
S&T Supporting Realization of Carbon Peak and Carbon Neutrality Goals

科技战略研究
Strategic Research on Science and Technology

引用格式：樊杰, 王红兵, 周道静, 等. 优化生态建设布局 提升固碳能力的政策途径. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 459-468.
Fan J, Wang H B, Zhou D J, et al. Policy approaches to increase carbon sequestration capacity by optimizing layouts of ecological construction. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4): 459-468. (in Chinese)

优化生态建设布局 提升固碳能力的政策途径

樊 杰[1,2,3]　王红兵[2*]　周道静[2]　马 宁[2]　刘宝印[2]

1 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101
2 中国科学院科技战略咨询研究院 北京 100190
3 中国科学院大学 资源与环境学院 北京 100049

摘要 通过生态建设提升固碳能力，是我国实现“双碳”目标的重要途径之一。文章在分析我国生态固碳现状和趋势基础上，总结了我国生态固碳能力提升面临的主要挑战。研究认为，需要通过生态系统内部结构优化和生态建设区域协调两方面促进生态建设布局优化，提升生态系统碳汇增量。在生态系统内部结构优化方面，提出重启成熟林地有序更新采伐、增强草原生态系统固碳能力和发挥“西线引水工程”碳汇增益作用等；在生态建设的国土布局优化方面，提出了统筹建立差异化区域碳中和路径，全面推进欠发达地区绿色发展，协调处理生态保护与清洁能源发展关系，促进区域生态环境改善和国土空间高效利用的战略路径。

关键词 碳中和，生态建设，生态布局，固碳能力，政策途径

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20220110006

碳减排和碳增汇是实现碳达峰、碳中和（以下简称“双碳”）目标的2个决定因素。其中，碳增汇即固碳，其核心是生态保护、建设和管理。由于植被自然生长和生态建设等因素，中国陆地生态系统发挥并将在未来继续发挥着重要的碳汇作用[1]。党的十八大以来，我国将生态文明纳入“五位一体”总体布局，倡导构建人类命运共同体、建设清洁美丽世界，开展了一系列根本性、开创性工作，推动生态环境保护修复和应对气候变化工作取得了突破性进展。2021年，习近平总书记在中央财经委员会第九次会议上强调，

*通信作者
资助项目：中国科学院学部重大咨询课题（E1J1691602）
修改稿收到日期：2022年3月23日

“实现碳达峰、碳中和是一场广泛而深刻的经济社会系统性变革，要把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局，拿出抓铁有痕的劲头，如期实现2030年前碳达峰、2060年前碳中和的目标”。从碳中和的长远目标来看，为了增强生态系统的固碳能力，需要从内部结构优化和区域发展协调2个方面优化生态建设布局。其中，内部结构优化主要是发挥重要生态系统固碳作用；区域发展协调主要是依托区域特色禀赋，选择差异化生态固碳能力提升路径。

1 生态固碳现状与趋势

1.1 生态固碳现状及态势

（1）森林固碳主体作用明显。改革开放以来，通过不懈地植树造林，我国森林覆盖率已由20世纪80年代初的12%提高到目前的23%，森林蓄积量提高到 1.75×10^{10} m^3，全国森林面积达 2.2×10^6 km^2。其中，人工林面积占全国森林总面积的1/3以上，连年来超额完成年度造林计划任务，人工林面积稳居全球第一（图1）。2020年10月 *Nature* 发布研究成果表明，2010—2016年我国陆地生态系统年均吸收约1.11 Pg C，约为先前国内外研究结果（0.35 Pg C）的3倍，这一巨大的固碳能力相当于吸收了同时期我国年均人为碳排放的45%[2]。我国陆地生态系统之所以拥有巨大的碳汇能力，主要来自于我国重要林区，尤其是西南林区的固碳贡献，同时我国东北林区在夏季也有非常强的碳汇作用。通过对恢复天然森林植被、加强人工林培育等方面的巨大投入，在全球森林面积减少的背景下，我国森林面积年均净增加量在近10年中排在全球第一位并且远超其他国家[3]，从而使我国陆地生态系统获得强大的固碳能力。

（2）草原生态系统碳汇增长潜力巨大。草地是地球上广泛分布的陆地生态系统类型之一，在全球碳循环中起着重要作用。我国天然草原面积近 4×10^6 km^2，约占国土总面积的40%，主要分布在东北平原、内蒙古高原、黄土高原、青藏高原和新疆山地，是全球草地生态系统的重要组成部分。我国草原总碳储量为28.95 Pg C，其中植被碳储量为1.82 Pg C，土壤有机碳碳储量为27.13 Pg C[4]。我国草地生物量和土壤碳库在过去20年没有发生显著变化，即我国草地生态系统是一个中性的碳汇[5]。2000年以来，我国草原地区陆续实施了“京津风沙源治理”“退牧还草”“天然草原保护”“石漠化治理”“草原监测预警”等多个重

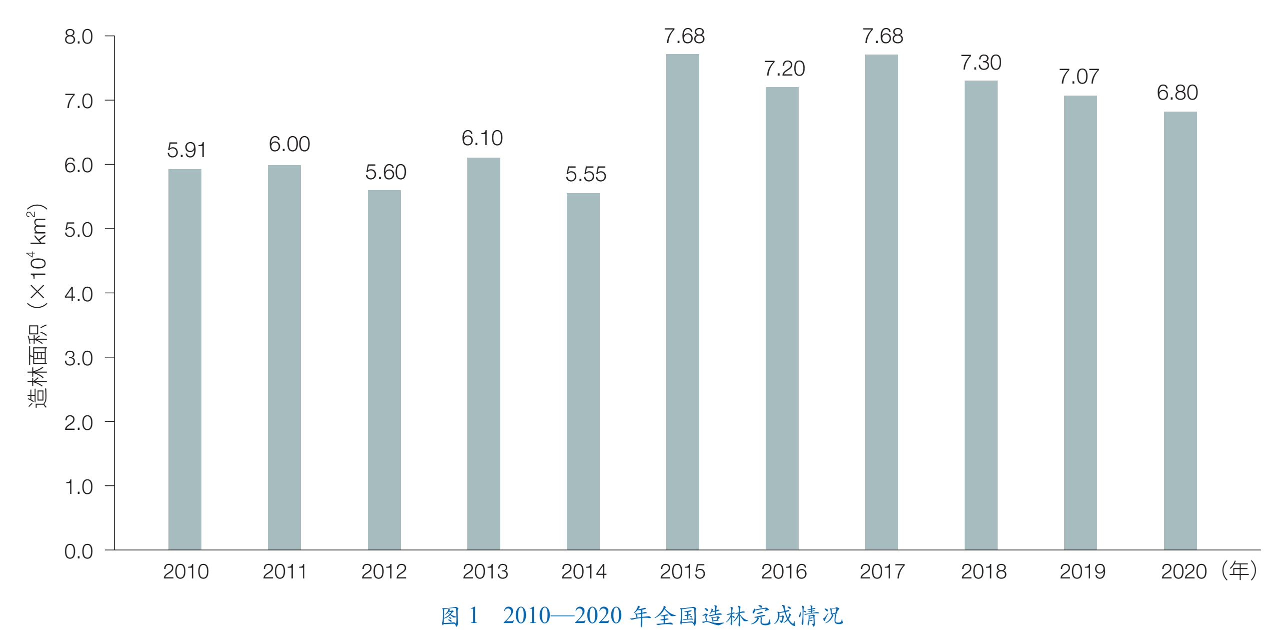


图1 2010—2020年全国造林完成情况

Figure 1 Completion situation of China national afforestation from 2010 to 2020

大生态工程，在一定程度上遏制了草原退化的势头。根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布的评估报告，每公顷天然草地每年能固碳 1.3 t，等同于减少 CO_2 排放量6.9 t。中国草地面积约 $4×10^6$ km^2，每年约能固碳 $5.2×10^8$ t，等同于每年减少 $2.76×10^9$ t 二氧化碳当量（CO_2e），为全国碳排量的30%—50%[6]。草原生态系统具有巨大的碳汇增长潜力，加强草原生态系统的保护和修复，对我国实现碳中和具有非常重要的意义。

（3）重大生态工程固碳效益显著。我国天然林保护工程、退耕还林工程、退耕还草工程、长江和珠江防护林工程等重大生态工程及秸秆还田农田管理措施等的实施，对我国陆地生态系统固碳能力提升起到了重要作用。对 6 项重大生态工程边界内外生态系统碳密度时空格局变化相关研究表明[7]，2000—2010 年，重大生态工程实施对生态系统碳储量和固碳能力提升发挥了重要作用，重大生态工程区内生态系统碳储量增加达到 1.5 Pg C，年均碳汇功能达到 132 Tg C，抵消了同期我国化石燃料燃烧 CO_2 排放的 9.4%。上述重大生态工程区生态系统年均碳汇的 56%（74 Tg C）可直接归因于重大生态工程的实施。

1.2 生态固碳面临的新挑战

1.2.1 成/过熟林积压影响森林固碳能力

自 1984 年实施《中华人民共和国森林法》以来，我国严格限制天然林采伐，全国多地颁布并实施“禁伐令”，以“养护”为主的森林管理措施长期实施。1987 年原林业部发布《森林采伐更新管理办法》，贯彻“以营林为基础，普遍护林，大力造林，采育结合，永续利用”的林业建设方针，执行森林经营方案，实行限额采伐，发挥森林的生态效益、经济效益和社会效益。对比“十三五”期间全国森林采伐限额，全国每年总额为 $2.5×10^8$ m^3，5 年内允许采伐量约占全国蓄积量的 1.45%，远低于我国成/过熟林蓄积量。另外，“十三五”期间，我国全面取消了天然林商业性采伐指标。2017 年，全国所有国有天然林均纳入停伐补助范围，非国有天然商品林停伐也分步骤纳入管护补助范围。采伐限额制度一定程度抑制了森林经营者投入造林管护的时间、资本及劳动力，导致“只种不管”或转投其他行业现象出现。

目前，我国森林资源中，乔木林成过熟林超过 $3.6×10^5$ km^2，面积占比超 20%，蓄积量占比近 40%。随着我国森林资源中成过熟林占比增高，大量枯立木、病腐木积压、腐烂，演变为碳的释放源，对实现碳中和造成一定负面影响。部分林区的成/过熟木增多，光合固碳和呼吸放碳相当，林区整体固碳能力下滑。对“天然林资源保护工程”历次森林资源清查结果显示，全区过熟林碳汇呈下降趋势[8]。

1.2.2 适宜种植林草国土面积有限

我国陆地生态系统总体固碳能力得益于不断扩大的森林面积，但我国干旱和半干旱地区占国土面积一半以上，耕地保障压力大，建设用地严重不足，导致宜林国土面积有限。历次全国森林资源清查结果显示，全国森林覆盖率的年增长率自 20 世纪 90 年代起呈快速下降趋势，从近 20% 下降到 5%（图 2）。

由于我国森林覆盖率增长将逐渐进入瓶颈期，未来仅依托造林面积“量”的增长来发挥森林固碳作用不可持续。从全国不同地区来看，华北、华东、中南等宜林地区的森林覆盖率均超 40%；西北地区森林覆盖率最低，不足 9%，但干旱缺水、沙漠地表导致该地区植树造林难度较大。

另外，对 1980—2018 年生态用地进行分析，结果表明重要生态空间内生态用地呈收缩趋势（图 3）。生态用地减少的主要原因一方面在于农业开发活动增强，同时生态用地增加也主要来源于农业用地，这说明退耕还林还草生态保护工程修复成效已经凸显；另一方面开发建设和农业活动持续侵占和破坏生态用地，生态保护形势依然严峻[9]。

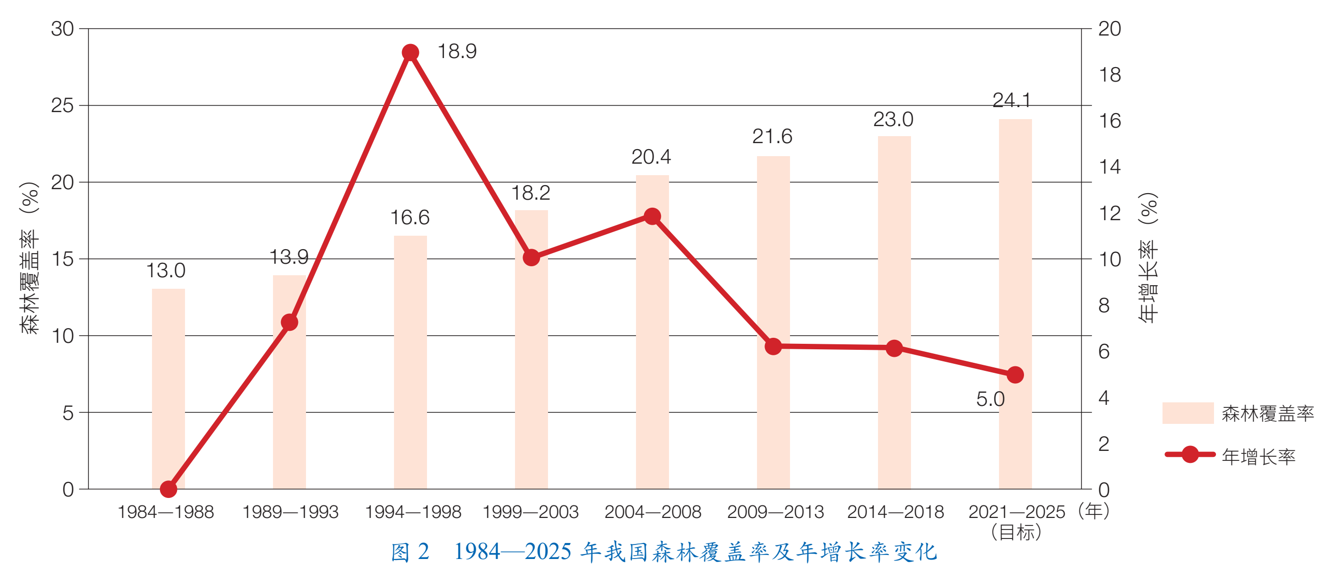


图 2　1984—2025 年我国森林覆盖率及年增长率变化
Figure 2　Variation of Chinese forest coverage rate and its growth rate from 1984 to 2025

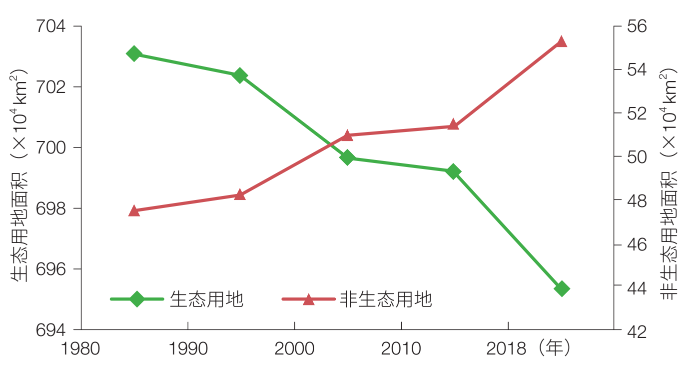


图 3　1980—2018 年我国重要生态空间内不同用地面积变化[9]
Figure 3　Changes of different land areas in China's important ecological space from 1980 to 2018[9]

1.2.3 生态工程多元投入机制待建立

目前，我国的重大生态工程仍以政府投入为主，投资渠道比较单一，资金投入整体有待提高。由于生态保护工程具有明显的公益性、外部性，经济收益低、项目风险高等特征，且目前我国市场投入机制、生态保护补偿机制仍不完善，缺乏有效的激励社会资本投入生态保护、生态修复的有效政策和措施，社会资本参与生态保护工程的意愿并不高。另外，由于生态工程建设的重点区域多为老、少、边、穷等本身财力不足地区，当地民众存在不同程度的“等、靠、要”思想①，缺乏鼓励各地统筹多层级、多领域资金、吸引社会资本积极参与重大工程建设的内生动力。

1.2.4 生态固碳配套政策措施待完善

以生态林业工程为例，目前尚存在社会法制观念落后、生态林业建设发展滞后等问题。由于生态林业工程建设系统性较强，必须借助相应的法律法规来推动，现行部分法律法规已不能满足林业发展需求，反而会影响工程建设效率。以重大水利工程为例，工程实施过程中征地补偿相关政策、补偿资金分配政策、移民安置办法等在落实过程中存在一定问题，款项分配透明度不够、分配不合理等，极易引发关联人群负面情绪，甚至阻碍工程进展。

2 提升重要生态系统固碳能力途径

2.1 重启成过熟林地有序更新采伐

随着成过熟森林比重上升、可供植树造林的土地有限，国内林木产品需求量又不断增长等问题加剧，为确保如期实现“双碳”目标，需要系统布局、持续

① 国家发展和改革委员会、自然资源部. 全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划（2021—2035 年）. 发改农经〔2020〕837 号.

监测、完善保障，有计划、分阶段、分区域开展森林更新砍伐，促进林木产业发展，提升森林固碳能力。

（1）逐步转变政策理念，设计“双碳”目标下森林更新路线。① 全面转变以禁伐为主的政策导向，有计划地部署重启森林采伐。一方面，强化法律制度导向，修订《中华人民共和国森林法》《中华人民共和国森林法实施条例》，将森林可持续固碳能力纳入基本理念和原则，完善森林采伐相关规定；修订《森林采伐更新管理办法》，扩大森林采伐范围，更新森林采伐的方式和途径。另一方面，完善森林采伐方式、方法和强度等方面的配套政策，加强政策宣贯和科普教育，尽快普及森林采伐政策要求和措施。② 在“双碳”目标的长周期框架下，设计从禁伐到更新采伐的路线图。森林固碳对于“双碳”目标实现具有重要作用，目前较多认识集中在植树造林方面。应在考虑更新采伐基础上重新估算未来森林固碳潜力，并按照碳达峰、碳中和阶段目标，形成“以造林为主，采伐为辅”→“造林与采伐并重”→“采伐为主，造林为辅”的长周期更新采伐路线图。

（2）加强顶层规划布局，开展成过熟林地采伐试点。① 统筹布局形成森林采伐顶层设计，构建从国家到各省份的森林采伐规划体系。在森林生态功能优先，充分考虑区域林木经济发展需求的总体原则指导下，根据我国成熟森林的分布，制定分阶段、分区域、差异化的采伐策略，构建森林采伐的“国家-省级-林区”3级规划体系。② 在基础设施完善的国有林场，率先开展成过熟林采伐试点。采伐试点的选择首要考虑林龄，同时需综合考虑林区基础设施情况、管理体制、人力资源等，建议首批试点地区选择在东北的大兴安岭、小兴安岭、长白山地区国有林场的成熟林地。

（3）强化“双碳”目标导向，构建森林采伐现代标准体系。① 建立我国森林碳交换监测数据库，为重启森林采伐提供科学依据。我国森林分布广、面积大、增长快、类型丰富。在发挥森林固碳能力最大效益目标下，应构建不同气候地带、不同类型、不同林龄森林生态系统碳交换监测评估体系，全面测算评估森林更新固碳潜力和对实现“双碳”目标的贡献，为森林采伐的科学准确性提供依据。② 根据林木类型和成熟度确定合理采伐强度，建立不同林木类型间伐标准；以提升森林土壤碳封存为目标，建立采伐技术标准及负面清单。综合考虑森林固碳效益、生态效益及经济效益，确定不同森林类型的最优轮伐期；通过成熟林地轮伐更新，挖掘森林固碳潜力。另外，在林木采伐过程中，为防止大面积的土壤扰动、炼山造林等影响森林土壤固碳效果，建立森林采伐技术标准和负面清单。

（4）提升支撑保障能力，完善间伐/选伐基础设备设施。① 改变以人工为主的木材采伐局面，提升林业技术装备研发和生产能力。我国林业技术装备发展起步晚，发展力度小，研发能力薄弱，使得林业木材采伐的机械化和自动化程度较低，很多地区仍依赖人工开采。应加大林业技术装备研发和生产能力，推动林业技术装备从传统的人工操作转向机械化、自动化和标准化发展。② 加大林区基础设施建设投资和政策扶持力度，建设适应间伐、选伐的现代基础设施网络。长期以来，以养护为目标的政策指引下，林区基础设施落后，道路总量不足、用水用电难以保障等问题突出。因此，应从适应更新采伐目标出发，科学合理设计水电路网等的密度和等级，构建现代化林区基础设施网络。

2.2 增强草原生态系统固碳能力

根据“双碳”目标的“两步走”战略设想，建立目标导向倒逼机制，研究谋划草原发展近景和远景目标，制定各阶段草原碳汇的目标指标，以及实现途径和政策建议等[10]。

（1）明确“双碳”目标下对草原新要求，强化草原固碳顶层设计。加快制定《草原应对气候变化行动

方案》，明确在“双碳”目标框架下草原应对气候变化中长期目标，制定扶持政策和管理措施；在保证我国草原生态平衡、资源可持续利用及区域经济社会可持续发展的前提下，制定气候变化情景下的适应性草原管理政策；选择和采取因地制宜的生态工程和技术措施，增强我国草原的碳汇功能。

（2）提升草原固碳科技支撑，建立差别化草地碳汇功能区。优化科技资源配置，把握草原科技创新方向，启动适宜于不同区域草地类型的草地碳汇功能区。① 针对成熟的优良草地，实施适度放牧、草蓄平衡，划定草地可持续发展区；② 针对退化、沙化、盐碱化等低劣草地，实施禁牧、播种补播等措施，划定草地修复功能区；③ 针对青藏高原独特草地生态系统，划定草地碳汇核心保护区。

（3）开展草原固碳能力监测，科学研判草原碳汇变化。不断丰富草原监测内容，在地面监测工作中增加草原植被、土壤有机碳等监测指标，为科学准确掌握我国草原碳汇现状和动态变化提供坚实的数据和信息基础。

2.3 发挥“西线引水工程”碳汇增益作用

重大生态建设工程碳增汇作用包括调水、治沙、保护和修复等。除了增强森林、草地、湿地和农田等固有生态系统的碳汇作用之外，还可以通过改善区域生态植被本底条件，促进形成新的碳汇。在系统推进生态保护和修复工程的同时，建议全面启动实施“西线引水工程”，充分发挥引水工程的碳汇增益作用，支撑西北地区碳中和进程。“西线引水工程”主要为开发西北提供水资源支撑，加快黄河上中游生态保护与高质量发展[11]。该工程实施面临的工程难度大、生态环境影响大、工程投资大等问题。在“双碳”目标框架下，“西线引水工程”可以通过“增汇减排”来解决工程实施的部分成本效益问题。

“西线引水工程”实现“双碳”目标的增益作用体现在：① 促进草地湿地面积增加，天然植被恢复。通过生态输水相关工程，促进沿线干旱半干旱地区天然植被恢复，草地湿地面积增加，形成新的自然碳汇。② 解决农业发展用水问题，增加耕地面积。西部干旱半干旱地区缺水严重，农业发展受限，通过“西线引水工程”解决农业发展用水，促进农田碳汇增加。以黑山峡生态灌区为例，“西线引水工程”一期规划水量配置方案年供水 1.8×10^8 m^3，可新发展灌溉面积约 280 km^2，其中草地 116.7 km^2、农田 77.3 km^2、林地 86 km^2[12]。③ 促进光伏等清洁能源发展，优化能源结构。一方面，光伏等新能源的发展，需要依托水来清洗光伏板；“西线引水工程”能够解决清洁能源发展需水问题，通过优化能源结构，减少碳源。另一方面，将光伏阵列布设于“西线引水工程”的水渠水面及防护带地面上，从而形成规模宏大的带状光伏电站，这每年减少将近 6.03×10^6 t CO_2 排放量，有助于“西线引水工程”的整体减排降碳[13]。

“西线引水工程”新增的碳汇增益可以通过碳排放权市场交易，转化为工程实施的成本投入。因此，在工程实施方面注重全面评估“西线引水工程”在固碳减排方面的效益，将其纳入生态效益统筹考虑；探索建立基于碳排放权市场的生态补偿机制，引入社会资本，构建多元化投资渠道。

3 生态建设与国土空间布局优化重点

3.1 统筹建立差异化的“双碳”目标实现路径

受自然条件、经济发展、产业结构、能源结构等方面影响，我国不同地区碳收支存在显著分异，且在未来一段时间内仍将持续[14]。因此，国家层面，应采用系统论的思想方法，从全局出发统筹考虑不同地区碳收支的基本特征、发展现状和未来趋势，尽快形成碳中和顶层设计和战略布局，明确不同地区的功能定位和政策重点，在实现“双碳”目标的同时促进区域均衡协调发展[15]。

对不同地区碳中和实现路径进行规划有 3 点建

议：① 对西部、东北等重点生态地区，重点围绕固碳增汇。进一步加强生态屏障建设，扎实推进重点生态工程和大规模国土绿化，最大程度挖掘地区碳汇潜力，有力支撑国家“双碳”目标实现；同时，积极开发地区在生物、景观、气候、能源等方面的优势，构建以生物医药、清洁能源、旅游文化、优质农牧业等为主体的绿色产业体系。② 对华中、华北等传统工业地区，重点围绕产业和能源转型升级。一方面，加大钢铁、机械等传统产业升级力度，积极开展工艺流程的绿色化改造，深入推进绿色制造发展；另一方面，着力开展能源结构优化，逐步降低传统能源比例，与西部清洁能源丰富地区建立长期合作机制，稳步提升清洁能源使用。③ 对华东、华南等发达地区，重点围绕低碳发展。以低碳技术研发创新为主要抓手，率先推进排放总量管控，从能源结构转型、产业用能转变、低碳城镇建设、绿色生活方式等方面，开展全方位、全流程的生产和生活绿色转型。

3.2 全面推进欠发达地区绿色低碳发展

欠发达地区在固碳增汇、清洁能源、生态资源等方面的优势，使其成为国家“双碳”目标实现不可或缺的中坚力量[16]。但受区域政策差异、自身发展需求等多方面因素影响，欠发达地区正成为东部“高耗能、高排放”产业的主要迁入地，温室气体排放持续升高，地区减排压力不断加剧[17]。因此，欠发达地区应及时调整发展思路，充分发挥地区在绿色发展方面的比较优势，拓展深化自然资源的价值转化路径，实现地区经济、社会和生态效益的共赢[18]。

欠发达地区“双碳”目标，需要加强与区域其他战略措施协同。① 在黄河流域生态保护和高质量发展、西部大开发等国家重大区域战略中，突出“双碳”目标的指导地位，完善清洁能源保障和固碳增汇等相关政策，在推动欠发达地区绿色资源更好服务国家战略的同时，促进地区经济发展转型。② 在绿色发展理念指导下，构建完善的乡村生态振兴政策体系，将乡村振兴工作与生态保护补偿、国家重大生态工程、生态产业发展、清洁能源产业等相结合，进一步巩固和发展地区乡村振兴成果。③ 鼓励和支持欠发达地区积极对接碳排放权、用水权、清洁能源等交易，推动跨区、跨省交易机制和配额制度的建立和完善，充分保障欠发达地区利益，推动欠发达地区发展建设，进而实现区域间的共同富裕和协调发展。

3.3 协调处理生态保护与清洁能源发展

稳步提升清洁能源使用，是我国优化能源结构、实现低碳发展的有力举措；但由于我国清洁能源资源分布与生态空间重叠严重，导致清洁能源建设与生态保护之间矛盾愈发突出，部分能源丰富地区甚至出现因各级、各类管控措施限制而无法开发的现象，对相关产业和区域自身发展均产生影响[19]。因此，亟待理顺生态保护与清洁能源发展关系，协调处理二者在空间、管理等方面的主要矛盾，科学推动清洁能源快速发展的同时，促进区域生态环境改善和国土空间高效利用。

协调处理我国生态保护与清洁能源发展的具体建议有 3 点：① 科学评估生态脆弱性和敏感性。结合太阳能资源、风能资源的丰富度和开发利用适宜性评价，单独设立新能源特殊用地类型，为光伏和风能项目预留用地空间。② 制定最严格的生态影响评估规程和综合影响评估规程。明确项目建设对当地和全域生态系统的正、反面影响，以及对实现“双碳”目标、促进地方实现现代化目标的影响，把统筹清洁能源空间布局列为我国清洁能源资源富集地区国土空间规划的一个专项规划，科学评估，合理布局。③ 统筹清洁能源项目建设与山水林田湖草沙生态系统修复工程协同部署，促进区域生态环境改善和国土空间高效利用。推动发展以清洁资源为主体的绿色循环产业体系，全方位助力地区实现绿色发展。

参考文献

1 方精云. 碳中和的生态学透视. 植物生态学报, 2021, 45(11): 1173-1176.
Fang J Y. Ecological perspectives of carbon neutrality. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021, 45(11): 1173-1176. (in Chinese)

2 Wang J, Feng L, Palmer P I, et al. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. Nature, 2020, 586: 720-723.

3 FAO. Global Forest Resources Assessment 2020: Main report. (2020-11-12)[2022-03-20]. https://www.fao.org/forest-resources-assessment/en/.

4 白永飞, 陈世苹. 中国草地生态系统固碳现状，速率和潜力研究. 植物生态学报, 2018, 42(3): 261-264.
Bai Y F, Chen S P. Carbon sequestration of Chinese grassland ecosystems: Stock, rate and potential. Chinese Journal of Plant Ecology, 2018, 42(3): 261-264. (in Chinese)

5 方精云, 杨元合, 马文红, 等. 中国草地生态系统碳库及其变化. 中国科学： 生命科学, 2010, 40(7): 566-576.
Fang J Y, Yang Y H, Ma W H, et al. Ecosystem carbon stocks and their changes in China’s grasslands. Scientia Sinica (Vitae), 2010, 53: 757-765. (in Chinese)

6 刘加文. 应对全球气候变化决不能忽视草原的重大作用. 草地学报, 2010, 18(1): 1-4.
Liu J W. The unignorable and important role of grassland in response to global climate change. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(1): 1-4. (in Chinese)

7 Lu F, Hu H F, Sun W J, et al. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. PNAS, 2018, 115(16): 4039-4044.

8 张逸如, 刘晓彤, 高文强, 等. 天然林保护工程区近20年森林植被碳储量动态及碳汇（源）特征. 生态学报, 2021, 41(13): 5093-5105.
Zhang Y R, Liu X T, Gao W Q, et al. Dynamic changes of forest vegetation carbon storage and the characteristics of carbon sink (source) in the Natural Forest Protection Project region for the past 20 years. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13) : 5093-5105. (in Chinese)

9 高吉喜, 刘晓曼, 王超, 等. 中国重要生态空间生态用地变化与保护成效评估. 地理学报, 2021, 76(7): 1708-1721.
Gao J X, Liu X M, Wang C, et al. Evaluating changes in ecological land and effect of protecting important ecological spaces in China. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(7): 1708-1721. (in Chinese)

10 陈雅如, 赵金成. 碳达峰、碳中和目标下全球气候治理新格局与林草发展机遇. 世界林业研究, 2021, 34(6): 1-5.
Chen Y R, Zhao J C. New pattern of global climate governance and opportunities for forest and grassland development under the targets of carbon emission peak and carbon neutrality. World Forestry Research, 2021, 34(6): 1-5. (in Chinese)

11 席海洋, 陈克恭, 鱼腾飞, 等. 南水北调西线一期工程调水新增水资源利用. 中国沙漠, 2021, 41(4): 158-166.
Xi H Y, Chen K G, Yu T F, et al. The utilization of water resources newly increased in the first phase of the West Line of South-to-North Water Diversion Project. Journal of Desert Research, 2021, 41(4): 158-166. (in Chinese)

12 聂常山, 赵宇瑶, 王延红. 南水北调西线一期工程效益分析. 人民黄河, 2020, 42(6): 120-124.
Nie C S, Zhao Y Y, Wang Y H. Benefit analysis of phase I project of west route of south-to-north water diversion. Yellow River, 2020, 42(6): 120-124. (in Chinese)

13 魏琦, 白保华, 何继江, 等. 能源与水利结合模式探索——以南水北调西线光伏天河工程为例. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 16-22.
Wei Q, Bai B H, He J J, et al. Exploring the mode of energy and hydraulic engineering combination—An example of the photovoltaic Tianhe project of the south-to-north water diversion west route project. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 16-22. (in Chinese)

14 张友国, 白羽洁. 区域差异化“双碳”目标的实现路径. 改革, 2021, (11): 1-18.
Zhang Y G, Bai Y J. Regional differ entiated paths for realizing “double carbon” targets. Reform, 2021, (11): 1-18. (in Chinese)

15 樊杰. 我国“十四五”时期高质量发展的国土空间治理与区域经济布局. 中国科学院院刊, 2020, 35(7): 796-805.
Fan J. High-quality development of national territory space

governance and regional economic layout during 14th five-year plan in China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(7): 796-805. (in Chinese)

16 樊杰, 周侃, 伍健雄. 中国相对贫困地区可持续发展问题典型研究与政策前瞻. 中国科学院院刊, 2020, 35(10): 1249-1263.

Fan J, Zhou K, Wu J X. Typical study on sustainable development in relative poverty areas and policy outlook of China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020, 35(10): 1249-1263. (in Chinese)

17 唐贵谦, 刘钰婷, 高文康, 等. 警惕大气污染和碳排放向西北迁移. 中国科学院院刊, 2022, 37(2): 230-237.

Tang G Q, Liu Y T, Gao W K, et al. Alert to the migration of air pollution and carbon emission to northwest China. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(2): 230-237. (in Chinese)

18 朱彤. 我国可再生能源的发展阶段与面临挑战. 中国国情国力, 2019, (7): 8-12.

Zhu T. Development stages and challenges of renewable energy in China. China National Conditions and Strength, 2019, (7): 8-12. (in Chinese)

19 樊杰, 王亚飞, 梁博. 中国区域发展格局演变过程与调控. 地理学报, 2019, 74(12): 2437-2454.

Fan J, Wang Y F, Liang B. The evolution process and regulation of China's regional development pattern. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(12): 2437-2454. (in Chinese)

Policy Approaches to Increase Carbon Sequestration Capacity by Optimizing Layouts of Ecological Construction

FAN Jie[1,2,3] WANG Hongbing[2*] ZHOU Daojing[2] MA Ning[2] LIU Baoyin[2]

（1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2 Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China）

Abstract Improving carbon sequestration capacity through ecological construction is one of the important ways to achieve the goal of "carbon neutrality" in China. Based on the analysis of the current situation and trend of ecological carbon sequestration in China, this study summarizes the main challenges in the increment of ecosystem carbon sink in China. The current situation and trend, the significant carbon sequestration capacity of forests, the recovery phase of carbon sequestration capacity of grassland, and the carbon sequestration benefits of major ecological projects are also surveyed. Then, the new challenges of China are analyzed, including the backlog of over-mature forests affecting the carbon sequestration capacity of forests, the limited land area suitable for planting forests and grasses, the less diversified investment mechanism of ecological engineering, the imperfect supporting policies and measures for ecological carbon sequestration, and the increasing demand for forest products. To make sure the "peak carbon emissions" and "carbon neutrality" goals reached as schedule, the study points out that it is necessary to optimize the layout of ecological construction and to improve the capacity of ecological carbon sequestration through the optimization of the internal structure of ecosystem and the regional coordination of ecological construction. In terms of the optimization of the internal structure of the ecosystem, several policy suggestions are put forward: restarting orderly renewal and forests logging, enhancing the ecological carbon sequestration capacity of the grassland, and fully implementing the water diversion project on the western line. For example, some related research suggestions are proposed on forest management, including redesigning the forest regeneration route, conducting pilot programs in some forest areas, constructing modern standard system of forest logging, and improving basic facilities of intermediate cuttings. In terms of the land layout optimization of ecological construction, this study suggests that the government should establish an overall planning with differentiated regional carbon neutrality path, promote the coordination of regional ecological protection and clean energy, accelerate the improvement of ecological environment, and utilize national land space highly efficiently.

Keywords carbon neutrality, ecological construction, ecological layouts, carbon sequestration capacity, policy approaches

*Corresponding author



樊　杰　中国科学院地理科学与资源研究所、中国科学院科技战略咨询研究院研究员，中国科学院大学资源与环境学院教授。长期从事人文与经济地理学、区域可持续发展过程与格局、主体功能区划与空间治理体系等研究。中国城市规划学会副理事长，中国地理学会国土空间规划分会主任，《经济地理》主编。全国"十四五"规划专家委员会委员，全国国土空间规划专家组成员，住房建设部人居环境专委会副主任委员，法国地理学会荣誉会士。承担第二次青藏高原综合科学考察研究任务、中国科学院战略性先导科技专项（A类）、国家自然科学基金重点项目等研究任务。发表学术论文近300篇，出版专著近30部。曾获中国科学院杰出科技成就奖。E-mail: fanj@igsnrr.ac.cn

FAN Jie　Doctor, Researcher at the Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (CAS), Researcher at the Institutes of Science and Development, CAS, and Professor at College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences. He has long been engaged in the research of humanity and economic geography, the process and pattern of regional sustainable development, the regionalization of main function and the spatial governance system. He is hosting or co-hosting a number of major research projects, e.g., "Function and System Optimization of Ecological Security Barrier" in the Second Comprehensive Scientific Expedition to the Qinghai Tibet Plateau, "Regional Green Development Plan" in the "Pan-Third-Pole Environmental Change and Green Silk Road" project of the Strategy Priority Research Program of CAS (Category A), and "Regional Function and Comprehensive Geographical Regionalization" Key Program of National Natural Science Foundation of China. He has published nearly 30 monographs and 300 papers in academic journals such as *Earth Future*, *Chinese Science Bulletin* and *Acta Geographica Sinica*. He has been awarded the Outstanding Science and Technology Achievement Prize of CAS. He is serving as Vice Chairman of Urban Planning Society of China, Director of Territorial Space Planning Branch of the Geographical Society of China, Editor-in-Chief of *Economic Geography*, Member of National 14th Five-Year Plan Expert Committee, Member of the National Expert Group on Territorial Space Planning, Vice Chairman of the National Special Committee on Human Settlements Environment, and Honorary Member of the French Geographical Society.
E-mail: fanj@igsnrr.ac.cn



王红兵　中国科学院科技战略咨询研究院助理研究员。主要研究领域：创新社会治理、可持续发展等。主持和参与中国科学院、中国科学技术协会、国家自然科学基金委员会等单位的20多项重大课题，已发表论文20余篇、出版学术著作4部。E-mail: wanghongbing@casisd.cn

WANG Hongbing　Ph.D. in Geography, Assistant Researchor of Institutes of Science and Development, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research focuses on innovation of social governance, sustainable development, etc. In recent years, he has mainly undertaken and participated in more than 20 major projects of the CAS, China Association for Science and Technology, National Natural Science Foundation of China, and so on. He has published over 20 academic papers and 4 academic books. E-mail: wanghongbing@casisd.cn

■责任编辑：张帆